



TITLE:

# 研究室紹介

AUTHOR(S):

---

CITATION:

研究室紹介. Cue 2018, 40: 18-37

ISSUE DATE:

2018-09

URL:

<https://doi.org/10.14989/235650>

RIGHT:

## 研究室紹介

このページでは、電気関係研究室の研究内容を少しずつシリーズで紹介して行きます。今回は下記のうち太字の研究室が、それぞれ1つのテーマを選んで、その概要を語ります。

(☆は「大学の研究・動向」、#は「高校生のページ」、\*は「新設研究室紹介」に掲載)

### 電気関係研究室一覧

#### 工学研究科 (大学院)

##### 電気工学専攻

##### 先端電機システム論講座 (引原研)

システム基礎論講座自動制御工学分野 (萩原研)

システム基礎論講座システム創成論分野

生体医工学講座複合システム論分野 (土居研)

生体医工学講座生体機能工学分野 (小林研)

電磁工学講座超伝導工学分野 (雨宮研)

電磁工学講座電磁回路工学分野 (和田研)

電磁工学講座電磁エネルギー工学分野 (松尾研)

優しい地球環境を実現する先端電気機器工学講座  
(中村武研)

##### 電子工学専攻

##### 集積機能工学講座

電子物理工学講座極微電子工学分野 (白石研)

電子物理工学講座応用量子物性工学分野 (竹内研)

電子物性工学講座半導体物性工学分野 (木本研)

電子物性工学講座電子材料物性工学分野 (山田研)

量子機能工学講座光材料物性工学分野 (川上研) ☆

量子機能工学講座光量子電子工学分野 (野田研)

量子機能工学講座量子電磁工学分野

##### 光・電子理工学教育研究センター

ナノプロセス部門ナノプロセス工学分野

デバイス創生部門先端電子材料分野 (藤田研)

#### 情報学研究科 (大学院)

##### 知能情報学専攻

知能メディア講座言語メディア分野 (黒橋研)

知能メディア講座画像メディア分野 (西野研)

##### 通信情報システム専攻

通信システム工学講座デジタル通信分野 (原田研)

通信システム工学講座伝送メディア分野 (守倉研)

通信システム工学講座知的通信網分野 (大木研)

集積システム工学講座情報回路方式分野 (佐藤高研)

集積システム工学講座大規模集積回路分野 (小野寺研)

集積システム工学講座超高速信号処理分野 (佐藤亨研)

##### システム科学専攻

システム情報論講座論理生命学分野 (石井研)

システム情報論講座医用工学分野 (松田研)

#### エネルギー科学研究科 (大学院)

##### エネルギー社会・環境科学専攻

エネルギー社会環境学講座エネルギー情報学分野 (下田研) #

##### エネルギー基礎科学専攻

エネルギー物理学講座電磁エネルギー学分野 (中村祐研)

##### エネルギー応用科学専攻

エネルギー材料学講座エネルギー応用基礎学分野 (土井研)

エネルギー材料学講座プロセスエネルギー学分野 (白井研)

#### エネルギー理工学研究所

エネルギー生成研究部門粒子エネルギー研究分野 (長崎研)

エネルギー生成研究部門プラズマエネルギー研究分野

エネルギー機能変換研究部門複合系プラズマ研究分野

#### 生存圏研究所

##### 中核研究部

生存圏診断統御研究系レーダー大気圏科学分野 (山本研)

生存圏診断統御研究系大気圏精測診断分野 (橋口研) \*

生存圏開発創成研究系宇宙圏航行システム工学分野

生存圏開発創成研究系生存科学計算機実験分野 (大村研)

生存圏開発創成研究系生存圏電波応用分野 (篠原研)

#### 学術情報メディアセンター

コンピューティング研究部門ビジュアルイゼーション研究分野  
(小山田研)

教育支援システム研究部門遠隔教育システム研究分野  
(中村裕研)

## 先端電気システム論講座（引原研究室）

<http://www-lab23.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

### 電力変換回路の高周波化によるパワープロセッシングに関する試み

Si デバイスはデジタルプロセッサなどに代表される微細 Si トランジスタ、および電力変換回路に用いられるパワートランジスタの2つに大別される。特に Si の微細加工技術の進展は著しく、それにもなつてデジタルプロセッサは飛躍的に進歩してきた。これに追従して絶縁ゲートバイポーラトランジスタ (IGBT) やスーパージャンクション型電界効果トランジスタ (SJ-MOSFET) などパワー Si トランジスタの研究開発もさかんに行われている。微細トランジスタは 1/0 の論理をあつかうデジタルの用途であり、電力変換回路に用いられるパワートランジスタは電力というアナログ量をあつかう。これら 2 種類のデバイスは別々に研究開発されてきた。

しかし、昨今 SiC、GaN デバイスが量産されるに至り、デジタルとアナログの境界が少しずつ曖昧になりつつある。たとえば情報通信分野において GaN 高電子移動度トランジスタ (HEMT) が注目されている。マイクロ波無線通信用途として 10GHz 帯で 100W の動作が実現されており、高出力・広帯域の通信用 GaN HEMT が開発されつつある。一方で、パワートランジスタとしての GaN HEMT の研究開発も進んでいる。駆動周波数としては 100kHz から 10MHz 程度であるが、非常に高い電力を扱うことができる。これら情報通信用および電力変換用の GaN HEMT にくわえて制御用の IC をすべてチップ内に組みこんだワンチップモジュールの研究開発が進んでいる。

本研究室では SiC MOSFET の高周波スイッチング特性に注目し、アナログ量をデジタル的に取りあつかうことを試みている。SiC はその優れた材料物性から低オン抵抗・高耐圧のデバイスが注目されているが、1MHz をこえる高周波スイッチング特性を有することも特長であり、大電力を高速にスイッチングすることができる。高周波スイッチング性能を引き出す回路設計をおこなうことで、従来の電力変換回路にあたらしい機能を付与したい。

図 1 に製作した降圧回路 (Buck Converter) を示す [1]。スイッチングデバイスとして ROHM 社の SiC MOSFET を使い、高周波駆動のために GaN HEMT を用いたゲートドライバを使用している [2]。電力変換回路の制御には通常パルス幅変調 (PWM) が用いられているが、本提案回路では駆動周波数をひきあげることで、パルス密度変調 (PDM) を適用する。パルスの個数として電力密度を制御する手法である。サンプリング周波数 13.56MHz の  $\Delta$ - $\Sigma$  変調をもちいており、その変調信号を直接ゲートドライバで増幅し、SiC MOSFET を駆動する。

製作した降圧回路におけるスイッチング波形を図 2 にしめす。パルス密度を 3/8 (38%) とした。SiC MOSFET の優れたスイッチング特性により、急峻なスイッチング波形が得られた。さらに、降圧回路の出力電圧を図 3 に示す。パルス密度を変化させることで、降圧回路の出力電圧を広い範囲で制御することが分かった。アナログ量をデジタル的に取り扱える領域が近づいており、これをパワープロセッシングと呼んでいる。引き続き高周波スイッチングを可能とするトランジスタの設計とともにその性能をひきだす回路設計手法の確立をつづけていく。

[1] Y. Sadanda, T. Okuda, and T. Hikihara, IEEE 18th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics, pp.1-4, 2017.

[2] K. Nagaoka, T. Hikihara et.al, IEICE Electronics Express, Vol.12, 20150285, 2015.

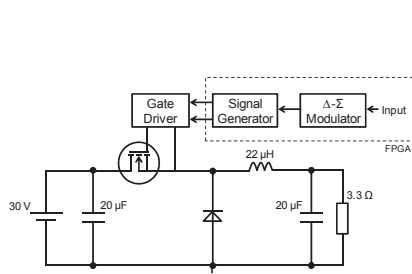


図 1 製作した降圧回路

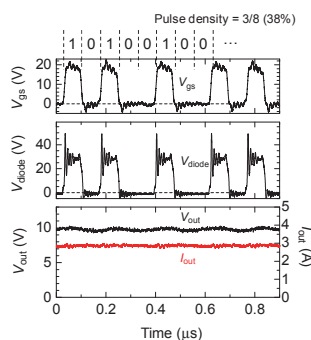


図 2 降圧回路におけるスイッチング波形 (パルス密度 38%)

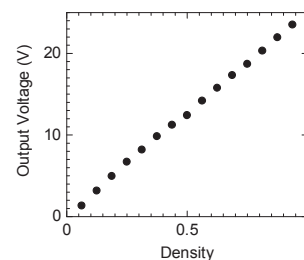


図 3 パルス密度変調による出力電圧の制御

## 電磁工学講座 超伝導工学分野（雨宮研究室）

<http://www.asl.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.html>

## 「ハイパフォーマンスコンピューティングの超伝導体の電磁界解析への応用」

高温超伝導線を用いたマグネット（電磁石）や各種電気機器は、省エネやコンパクト化が可能で、医療、エネルギー、交通、産業といった幅広い分野への応用が期待されています。しかし、テープ形状をした高温超伝導線内部の電磁現象（量子化した磁束の分布とその運動、すなわち、非一様な電流分布とその時間変化）が、MRI や粒子線がん治療装置などのマグネットにおいて磁界精度を損なったり、各種電気機器において交流損失と呼ばれる損失を発生したりすることが知られており、電磁現象の解明が重要な課題となっています。電磁現象の解明には数値電磁界解析が有力な手段ですが、超伝導マグネット、超伝導電気機器の数値電磁界解析では以下のような点が問題となってきました。

- ・ 通常のコイル（巻き線）の磁界解析のようにコイルを構成する電線に強制電流を流すだけでなく、その中の渦電流解析が必要でメッシュを細かくする必要があること
- ・ 3次元形状のコイルを正確にモデル化するとさらにメッシュ数が増えてしまうこと
- ・ 高温超伝導線の超伝導体は幅が数ミリ、厚さが数ミクロンの薄膜で断面アスペクト比が大きく、断面に適切なメッシュを切ることが困難であること
- ・ 超伝導線は非線形性の強い導電性をもった導体であり、非線形反復計算の収束性が悪いこと

我々の研究室では、超伝導薄膜への薄板近似の適用、階層型行列法（H マトリクス法）によるメモリ圧縮、非線形反復のためのニュートンラプソン法への代数マルチグリッド法による前処理の適用、並列処理などにより、これらの問題の解決をはかっています。階層型行列法は低ランク近似により密行列の計算に必要なメモリを圧縮する手法（図1）で、これにより消費メモリを100分の1に圧縮しました。また、超伝導線の非線形導電特性の反復計算のためのニュートンラプソン法に代数マルチグリッド法による前処理を適用することで実効的な反復回数を大幅に低減することに成功しました。さらにMPIにより並列処理の適用も行い、自由度150万の解析を78時間で完了することに成功しました。これは、この種の解析では世界的にみてもトップの成果です。なお、このときの消費メモリは177 GBでしたが、階層型行列法を適用しなければ密行列の消費メモリは16.7 TBとなっていたと見積もられ、階層型行列法の適用により本解析ははじめて可能となりました。

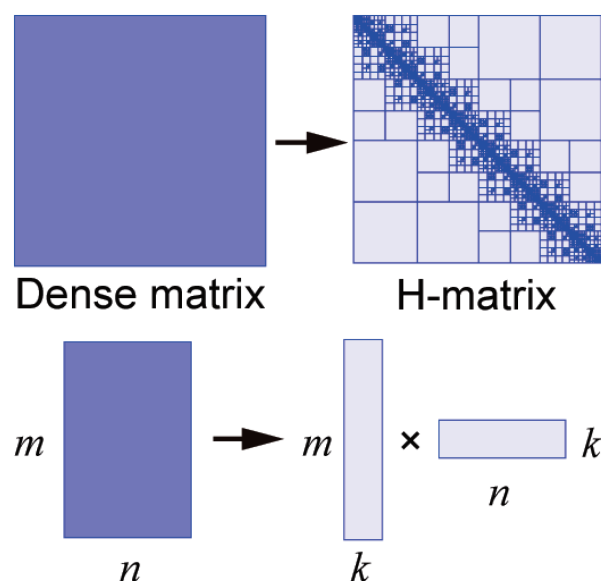


図1 階層型行列法における低ランク近似の概念図

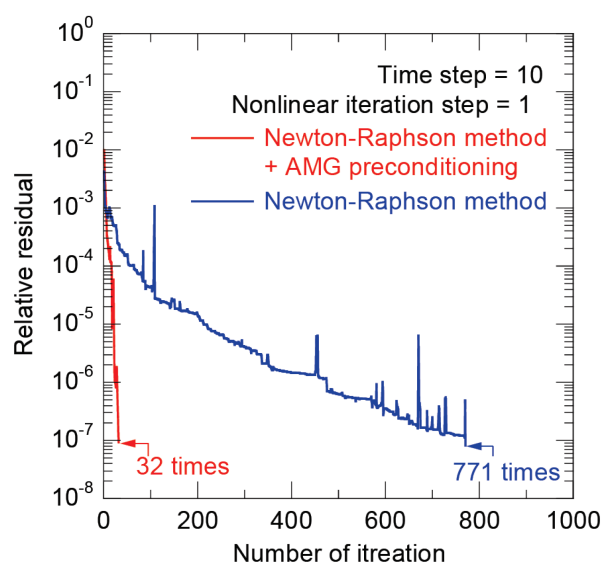


図2 ニュートンラプソン法への代数マルチグリッド法による前処理の適用



## 電磁工学講座 電磁エネルギー工学分野（松尾研究室）

<http://fem.kuee.kyoto-u.ac.jp/EMEE-lab/index.html>

## 「電気電子機器に対するモデル縮約法の開発」

電気自動車やロボットに用いられるモータには出力・効率の向上とともに高い制御性能が求められる。モータなど電気機器の高精度解析には大規模連立方程式の求解が必要で、このため、外部制御回路を含めた連成解析には膨大な計算時間を要する。現在、精度を損なうことなく電気電子機器を等価回路に置き換えるモデル縮約の手法が進展しており、Cauer ladder network (CLN) 法 [1] と呼ばれている。

例として、図 1 のような鉄芯とコイルからなる単純な構成を考える。電圧源をコイルに接続すると電流が流れるが、それは図 2 (a) のような 1 個の抵抗  $R_0$  から回路で表され、そのインピーダンスは、

$$\frac{V}{I} = R_0 + (\text{余り}) \quad (1)$$

のように表される。ただし、電流は磁束を作るので  $R_0$  だけでは正しくなく、式 (1) には残り (余り) の部分が生じる。残る成分をインダクタ  $L_1$  で表すと、回路は図 2 (b) のようになり、インピーダンスは、

$$\frac{V}{I} = R_0 + \frac{1}{\frac{1}{j\omega L_1} + (\text{余り})} \quad (2)$$

のように表される。 $L_1$  の磁束が時間変化すると起電力が生じ、それにより導体部分に誘導電流が流れることから、式 (2) にも余りが残る。この誘導電流の寄与を抵抗  $R_2$  で表し、次に、抵抗  $R_2$  に流れる電流が新たに磁束を作ることを考え、その寄与を  $L_3$  で表し、さらに、 $L_3$  の磁束による誘導電流の寄与を  $R_4$  で表し、…と続けていくと、式 (3) で表される図 3 のような、はしご形回路が続くことになる。

$$\frac{V}{I} = R_0 + \frac{1}{\frac{1}{j\omega L_1} + \frac{1}{R_2 + \frac{1}{\frac{1}{j\omega L_3} + \frac{1}{R_4 + \frac{1}{\frac{1}{j\omega L_5} + \dots}}}}} \quad (3)$$

上式に現れるインピーダンスの余りの部分は、はしごの段数を増やしていくと高周波側に追いやられ、適当な段数ではしご形回路を打ち切っても必要な周波数範囲で正確に電磁界を表現できる。なお、図中には各インダクタが作る磁束線も示している。これらは直交関数列を構成しており、これらを合成することにより、インピーダンスだけでなく磁界分布を正確に再現することができる。現在、CLN 法は多ポート化や展開点の導入など応用範囲が広がっており、今後、モータ解析への応用を予定している。

[1] A. Kameari, H. Ebrahimi, K. Sugahara, Y. Shindo, T. Matsuo, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 54, 7201804, Mar. 2018.

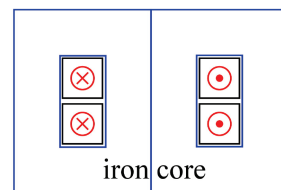


図 1 鉄芯インダクタ

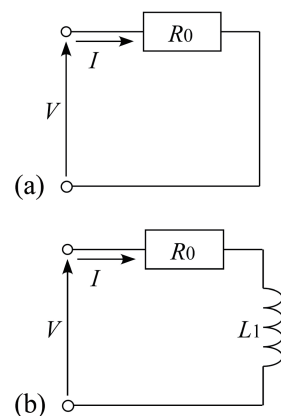


図 2 回路表現

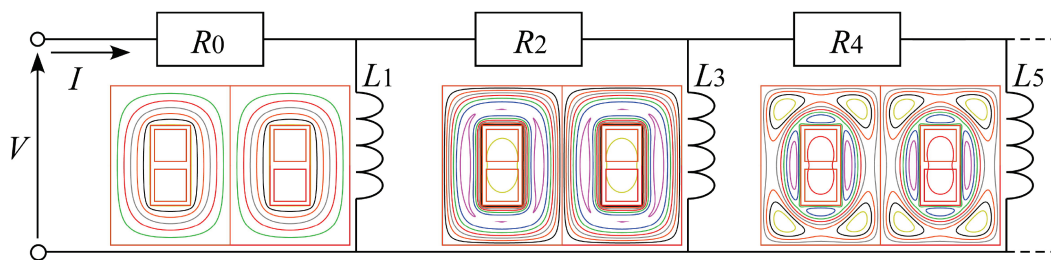


図 3 電磁界の Cauer 回路表現

# 優しい地球環境を実現する先端電気機器工学講座（中村武研究室）

<http://aem.kuee.kyoto-u.ac.jp>

## 「アルニコ磁石を固定子に利用したスイッチトリラクタンスモータの高性能化」

当研究室では、安価なアルニコ磁石を利用したスイッチトリラクタンスモータ（Switched Reluctance Motor: SRM）の高性能化に関する研究を実施している。SRM は、回転子ならびに固定子の突極性を利用して励磁をスイッチさせることによってトルクを発生させるモータであり、永久磁石を使用しないことから安価である他のメリットを有するが、回転原理上低力率やトルクリップルなどの課題を克服しなければならない。一方で、希土類系永久磁石界磁を利用して磁石トルクを主たる駆動源とする永久磁石モータは高効率であるものの、当該磁石が高価であることや供給不安があり、さらに高速回転領域では弱め界磁制御が必要などの問題も存在する。本研究では、SRM の回転子構造はそのままにして、固定子側の磁気回路内に安価なアルニコ磁石を配置して起磁力をアシストすることによって（以下、new-SRM と呼ぶ）、従来型 SRM に比較して高出力密度化、高効率化、および高力率化を同時に実現した [1]。また、直接瞬時トルク制御（Direct Instantaneous Torque Control: DITC）を適用することによって、トルクリップルの低減にも成功した [2]。

図 1 には、new-SRM の 3 次元構造図を示す（固定子外径: 195 mm、軸長: 100 mm）。本構造は、固定子のバックヨークの一部に安価なアルニコ磁石が埋め込まれていることがポイントである。アルニコ磁石は、その残留磁束密度が NdFeB 磁石と同等に高いものの、保磁力の小さなことが課題であるが、上記構造では同磁石が経路する磁束は常に一方向であり、その着磁束を有効に利用可能である。本モータを、図 2 の非対称ハーフブリッジコンバータで制御する。図 3 には、定常出力特性の解析結果の一例を示すが、アルニコ磁石でアシストすることによって、同一体格にも拘らず広範な回転数において大きく向上している。また、このときの効率や力率も改善することが明らかになっている。さらに、図 4 に示すように、DITC を適用することによってトルクリップルも大きく低減できている。今後は、上記解析結果を電気-機械エネルギー変換の観点から明確化すると共に、実機試験を通して特性検証していく予定である。

[1] F. Kucuk and T. Nakamura, International Conference on Electrical Machines 2018 (ICEM'2018) AF-005185

[2] F. Kucuk and T. Nakamura, in preparation

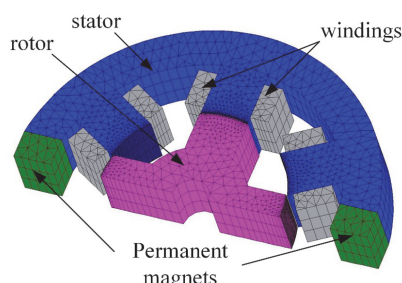


図 1 new-SRM の 3 次元構造図 [1]

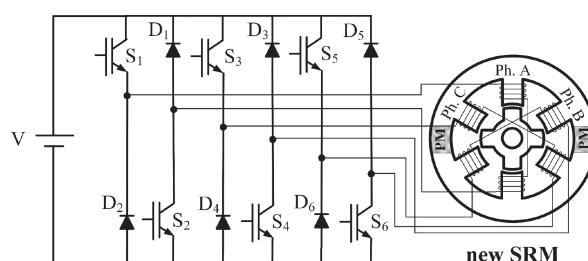


図 2 非対称ハーフブリッジコンバータによる駆動回路 [1]

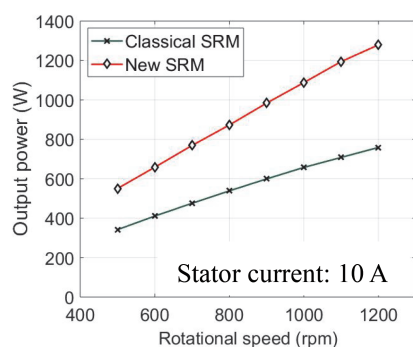


図 3 定常出力特性の解析例 [1]

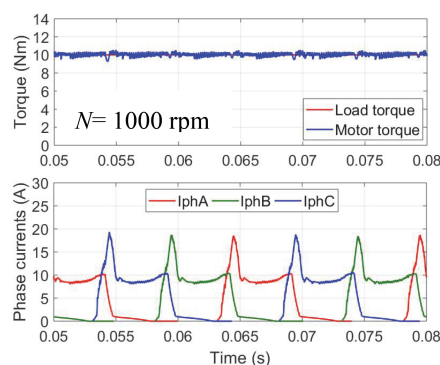


図 4 DITC を適用した出力波形の解析例 [2]

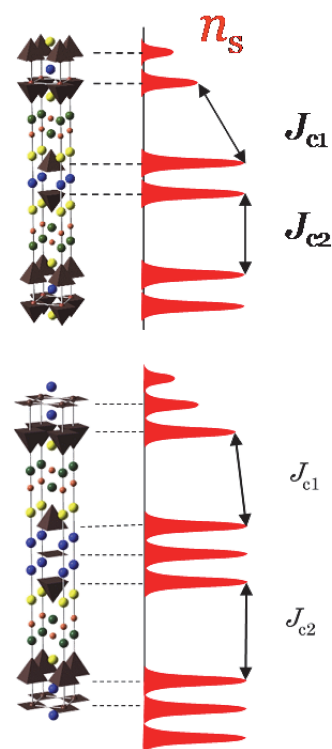
## 集積機能工学講座

<http://sk.kuee.kyoto-u.ac.jp>

## 「固有ジョセフソン特性で見た銅酸化物高温超伝導体の銅 - 酸素原子面多層構造」

1986年に発見された銅酸化物高温超伝導体は実現が容易な液体窒素の沸点程度の温度で超伝導になることから、様々な超伝導現象の工学的な応用を現実的にしました。一方学術的な意義として、超伝導・電子相関現象に関する数多くの真実が明らかになっただけでなく、実験技術の飛躍的な向上が物質科学全般における新発見・新概念をもたらしました。物質を構成する単位胞をさらに細かく分割して、それぞれの機能を元に物質を設計する手法は、化学と物理が強く結びついた結果であり、最近実用化されつつある新素材は、高温超伝導の発見と深く関係しています。層状の結晶構造を有する銅酸化物高温超伝導体において、超伝導キャリアは $ab$ 面方向に広がる $\text{CuO}_2$ 層に局在しています。 $\text{CuO}_2$ 層が積層する $c$ 軸方向の超伝導は、トンネル現象であるジョセフソン効果が担っており、ジョセフソン結合の強さが超伝導異方性を決定しています。このように、超伝導体の結晶構造に由来するジョセフソン接合を固有ジョセフソン接合と呼び、BSCCO ( $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4+\delta}$ ,  $n = 1 - 3$ ) など異方性の高い超伝導体で、 $c$ 軸超伝導はジョセフソン効果に由来する多彩な振る舞いを示し、超伝導現象に関する知見だけでなく、デバイス応用への可能性を提供します。BSCCOには、単位胞あたりの $\text{CuO}_2$ 原子面の枚数 $n$ が1-3と異なる、3種類の物質があります。私たちは、これら3種類のBSCCO超伝導体を用いて、 $\text{CuO}_2$ 原子面の枚数によって本質的に異なる現象を解明しました。

私たちの研究室で独自に開発した、原子レベルでの制御が可能な微細加工法を用いて作製した試料の超伝導転移における電気抵抗のふるまいや、電流電圧特性を詳細に調べてみると、 $\text{CuO}_2$ 原子面が2枚であるBi2212 ( $T_c < 90\text{K}$ )と3枚であるBi2223 ( $T_c < 110\text{K}$ )では、明らかな違いがあることがわかりました。超伝導体に超伝導でない常伝導金属を蒸着法などによりミクロに密着させると、超伝導体中の超伝導電子が常伝導金属に染み出します。この近接効果の影響がBi2212に比べてBi2223は顕著に弱くなり、 $n$ の増加に伴う超伝導層の厚さの増加から推測される量を大きく上回る減少となることがわかりました。このことは、超伝導電子は複数の $\text{CuO}_2$ 原子面から構成される超伝導層全体に一樣に分布しているのではなく、 $\text{CuO}_2$ 原子面内に局在していると考えerことで説明ができます。また、ジョセフソン接合における位相のトンネル現象にもこのモデルで説明できる現象が観測されています。超伝導層の薄い $n = 1, 2$ の場合は、隣接する接合における位相差の強い結合を示す量子トンネル現象が観測されました。一方で、 $n = 3$ の場合には、隣接する接合間の強い結合を示す結果は得られませんでした。このような、超伝導層内部に、超伝導電子の局在が顕著に表れている例は、これまでに報告されておらず、今後、固有ジョセフソン現象の説明には、超伝導層内部の構造を取り入れた詳細な理論の構築が必要であることが提案されました。



図：Bi2212 (左) および Bi2223 (右) の結晶構造と超伝導電子濃度  $n_s$  の分布と最大ジョセフソン電流  $J_c$  の関係



## 電子物理工学講座 極微電子工学分野（白石研究室）

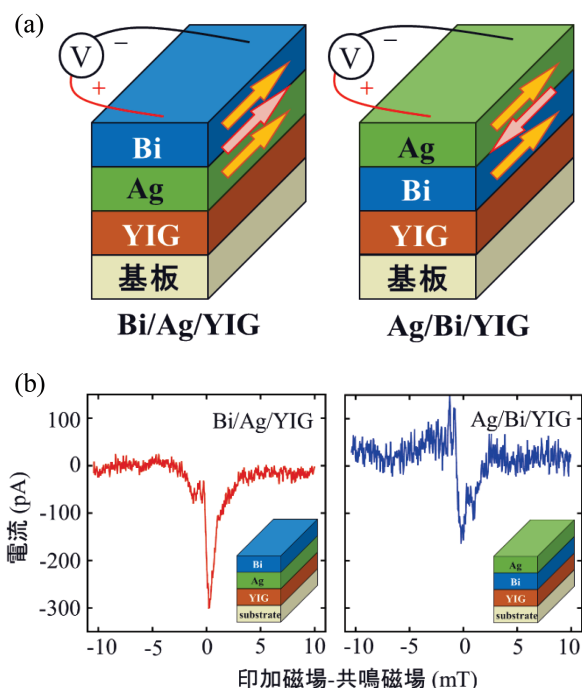
<http://cmp.kuee.kyoto-u.ac.jp>

## 「物質界面におけるスピン変換の研究」

スピントロニクスとは電子の持つ電氣的性質「電荷」と磁氣的性質「スピン」を同時に制御する分野であり、微細加工技術が発達した近年急速に発展してきました。この分野で注目されている「スピン流」はスピンの向きに偏りが生じた電子の流れであり、特にスピンの向きが完全に揃った純スピン流は情報輸送の新たな媒体として期待されています。しかし、純スピン流は全体として正味の電荷の流れがゼロであることから従来の測定器では検出されず、検出には電流など測定可能な物理量に変換する必要があります。そのため、スピン流を電流に変換する現象は、電流をスピン流に変換する現象とともに、スピントロニクスにおいて重要視されています。スピン流の生成・検出方法の一種に、電子がバルクや界面で散乱される際にスピン軌道相互作用の影響によりスピンの種類に応じて異方的に散乱される現象を用いる手法があります。試料に面直方向から注入された電流（スピン流）は、それを構成する電子が異方的散乱を受けることで面内方向のスピン流（電流）へと変換されます。バルク、界面においてスピン流を電流に変換する現象をそれぞれ「逆スピンホール効果（ISHE）」、「逆ラシュバ-エーデルシュタイン効果（IREE）」と呼びます。特に後者の現象は、Bi/Ag 界面において高いスピン流-電流変換効率が報告されています。

我々の研究室ではスピン流と電流の相互変換現象の研究の一環として、IREE が顕在化する界面の探索を行っています。その過程で、Bi/Ag 界面におけるスピン変換現象の報告結果を検証するために、IREE 以外に起因した成分を考慮した上で、界面での IREE によるスピン変換効率の評価を行いました。先行研究では Bi/Ag/NiFe を作製し、磁性体の強磁性共鳴下においてスピン流を接合された物質に注入する「スピンポンピング法」を用いて、磁性金属 NiFe から Bi/Ag 二層膜にスピン流を注入しています。このとき、スピン注入源の NiFe と Bi、Ag の各金属層において ISHE により生成される電流を考慮せずに、Bi/Ag 界面での IREE によるスピン変換効率を評価しています。そこで我々は、スピン注入源に ISHE による電流が発生しない磁性絶縁体イットリウム鉄ガーネット（YIG）を導入し、生成される電流のうち IREE 由来の電流の向きのみが異なる 2 種類の試料 Bi/Ag/YIG、Ag/Bi/YIG を作製し（図（a））、測定された電流（図（b））の差から IREE の寄与による成分を抽出し、IREE によるスピン変換効率を評価しました。結果的に、Bi/Ag 界面での変換効率は先行研究における報告値より少なくとも 1 桁小さいことが確認されました。現在は本研究で培った解析方法に基づいて、Bi や Ag を含む二層膜系におけるスピン変換の定量的評価を目指しています。

参考文献：M. Matsushima *et al.*, “Quantitative investigation of the inverse Rashba-Edelstein effect in Bi/Ag and Ag/Bi on YIG” *Applied Physics Letters* **110**, 072404 (2017).



図：(a) 各試料の構造と金属バルク・界面で生成される電流の向き、(b) 各試料で観測された電流



## 工学研究科 附属光・電子理工学教育研究センター ナノプロセス工学分野 「新機能光ナノデバイスの開発」

物質をナノメートル（＝ $10^9$  メートル）精度で加工する技術（ナノプロセス技術）は、現代社会において、ものづくり、医療、エネルギー等、あらゆる産業の基盤となる技術です。当研究室では、半導体や金属材料のナノプロセス技術を駆使した光ナノデバイスの開発を行い、ナノ構造に特有の光物理現象の探求や、従来のデバイスでは実現不可能であった新しい機能の創出を目指しています。

従来のデバイスとは異なる、全く新しい機能をもつ光ナノデバイスを実現するためには、目的の機能を有するナノ構造の設計手法と、設計した光ナノ構造を正確に再現する作製技術が必要となります。当研究室では、光ナノ構造の設計のために、時間領域差分法（Finite Domain Time Difference Method: FDTD 法）、結合波理論、厳密結合波解析（Rigorous Coupled-Wave Analysis: RCWA）法など、複数の電磁界シミュレーション法を駆使し、またこれらを拡張した新たな理論解析手法を確立することで、新機能をもつ光ナノ構造の提案を世界に先駆けて行っています（図1）。また、設計構造の作製においては、電子ビーム描画装置やプラズマエッチング装置等のナノプロセス装置を活用することにより、ナノメートル精度の微細加工を実現しています（図2）。さらに、上で述べた光ナノ構造の設計・作製技術を応用することで、高出力・高ビーム品質な発振を実現するレーザ光源や、加熱するだけで目的の波長の赤外線を高効率に発する熱輻射光源、テクスチャ構造を上回る光の吸収が可能な高効率太陽電池など、従来の光デバイスとは動作原理や機能が異なる次世代光源の開発を行っています（図3）。なお、本研究室は、電子工学専攻光量子電子工学分野と連携をとりながら教育研究を行っています。

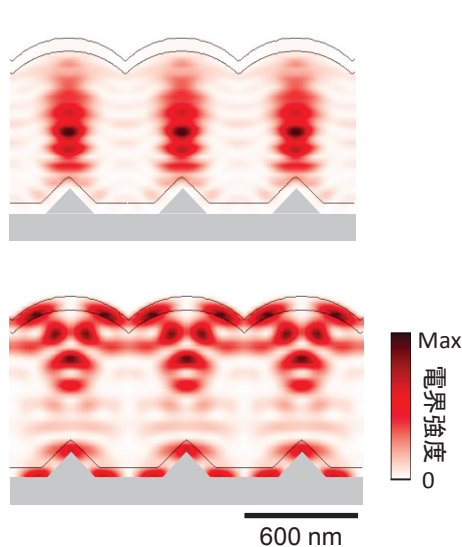


図1：光ナノ構造の電磁界解析例  
(光ナノ構造を導入した太陽電池)

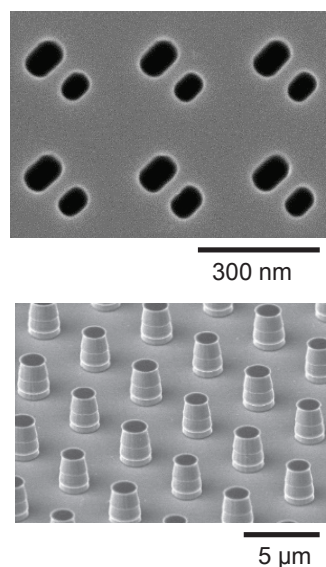


図2：種々の光ナノ構造の  
電子顕微鏡写真

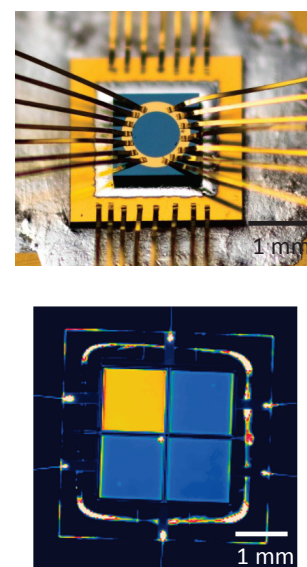


図3：光ナノ構造を利用  
した次世代光源の開発例  
(上) 高出力レーザ  
(下) 多波長熱輻射光源

光・電子理工学教育研究センター デバイス創生部門 先進電子材料分野(藤田研究室)  
<http://pesec.t.kyoto-u.ac.jp/ematerial/index.html>  
「未知の酸化物半導体材料への挑戦」

「酸化ガリウム ( $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ) というワイドバンドギャップ半導体の成長をしてみたい」当時 M2 の大島孝仁君がそう言い出したのは 2006 年のことであった。 $\text{Ga}_2\text{O}_3$  というと、GaAs の MOSFET を目指した先輩方が苦勞された材料である [1] が、バルク単結晶の成長がなされていた。当時は GaN を用いた青色 LED が手の届くところに来て、ワイドバンドギャップ半導体の研究が大きな注目を受けており、よりバンドギャップの大きな半導体の研究は時代の流れにも叶うものであった。また、GaN と違ってすでにバルク基板が得られていることに意欲をそそられた。なによりも、博士後期課程への進学を望んでいた学生の発想を大切にしたいと思った。そこで、ZnO の成長を行っていた MBE 装置に Ga の供給源(セル)を取り付け、 $\text{Ga}_2\text{O}_3$  の成長実験を開始した。しかしいざ  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  基板上に結晶成長をすると、非常に成長速度が遅い。徹夜で成長しても満足な厚さが得られない(この理由は後に他の研究機関から明らかにされ、問題が克服された)。その苦勞の中で、 $\text{Ga}_2\text{O}_3$  がその大きなバンドギャップにもかかわらず半導体として動作すること、 $(\text{Al,Ga})_2\text{O}_3$  混晶によるバンドギャップ制御やヘテロ構造が得られることが明らかになった。大島君はこの材料への想いを cue 第 19 号 (2008 年 5 月) で述べている。

一方で、 $\text{Ga}_2\text{O}_3$  基板の入手が容易でないことから、サファイア基板を用いて成長を行うと、これまで通常環境下で得られたことのない準安定状態の結晶(結晶構造から  $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$  と呼ばれる)が得られた。もしこの結果が間違いだったら長く恥さらしになる、と覚悟しつつ 2008 年に論文発表した。しかし結晶に電気が流れるようになったのは 2012 年だった。その後 2016 年には株式会社 FLOSFIA からパワーデバイス応用にふさわしい低損失のショットキーバリアダイオードが報告され、製品として世に出ようとしている。一方、 $\text{Ga}_2\text{O}_3$  は n 型ができて p 型が困難で、これがデバイスへの応用上大きな課題である。それなら  $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$  と結晶構造が同じで格子長のほぼ等しい p 型材料はないかと模索して、金子健太郎助教が  $\alpha\text{-Ir}_2\text{O}_3$  という酸化物材料に行き当たった。単結晶を成長した例は過去になかったものの、気合と努力で pn 接合が得られるようになり、デバイスの進展に大きなインパクトを与えている。

$\text{Ga}_2\text{O}_3$  のバンドギャップが大きいことは、高耐圧、低損失のパワーデバイス応用に望ましい。加えて将来における低コストでのデバイス供給が期待されている。世界的には  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  基板(熱安定な結晶構造で  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  と呼ばれる)を用いたデバイス開発が主流であるが、 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$  はより低コストであり、バンドギャップも大きく、混晶による多様なヘテロ構造や格子整合した pn 接合が得られる利点もある。現在、 $\text{Ga}_2\text{O}_3$  の将来性に目を向ける研究者が増し、2015 年に当研究室のあるローム記念館でこの材料に関する最初の国際ワークショップを開催して、約 130 名の参加を得て 99 件の研究発表がなされた。2017 年には 2 回目の国際ワークショップがイタリアで開催されて 156 件の研究発表があった。大島君が「 $\text{Ga}_2\text{O}_3$  という半導体があるらしい」と言っていた頃から 10 年余りで、ここまで研究の関心が集まるとはわれわれも思い得なかった。

わたしたちは、未知の酸化物半導体の開発に挑み、社会の変革を起こすことを夢見て研究を行っている。最近では半導体による波長 200 nm 以下の発光を得ることを目指し、岩塩構造  $\text{MgZnO}$  超格子という新しい材料の研究を行っている。目標の 200nm はもう手中にある。このような研究は、先人の足跡にとらわれない着想と苦勞に支えられている。研究室を巣立った人たち、在籍する学生諸氏、周辺で支えてくださる方々、これらすべての方の夢と努力がここに結実していることに深く感謝したい。

[1] 菅野卓雄, 真空 19, 60 (1976), 長谷川英機, 応用物理 47, 441 (1978).

## 知能メディア講座 言語メディア分野（黒橋研究室）

<http://nlp.ist.i.kyoto-u.ac.jp/>

### 「言語の多様な構造的特徴に関する研究」

言語研究には、個別言語を選んで取り組まねばならないという特徴があります。残念ながら、ある言語から得られた知見が他の言語にもあてはまるとは限りません。しかし、当研究室で扱っている言語は日本語のほかは英語と中国語だけです。言語処理分野全体を見ても、よく研究されている言語はせいぜい10個程度です。このような研究状況では、我々は言語の特性の一部しか見ていないのではないかという疑念を拭いきれません。そこで、本稿では、通常のテキスト解析とは異なる取り組みを紹介します。

2005年に公開された World Atlas of Language Structures は、世界中の3,000近い言語を200近い構造的特徴によって分類しています（ただし言語と特徴の組のうち、約85%が欠損）。構造的特徴とは、例えば、主語（S）・目的語（O）・動詞（V）の語順（SVOやSOVなど）や声調の有無などです。膨大な数の、名前すら聞いたことのない言語たちが、人間の言語がとりえる構造の多様性を教えてくれます。

このデータセット自体はいわゆる文系の言語学者たちが作成したのですが、その特性の分析には計算集約的な統計手法が威力を発揮することを我々は示してきました。特にベイズ統計に基づく確率的生成モデルにより、欠損値の多さに頑健な推論を実現しました。とりわけ興味深いのは、ある特徴がある値をとるなら別の特徴がある値をとるといった依存関係が見られることです。このことから、言語が時間とともに変化する際、複数の特徴が連動して変化することが示唆されます。そこで、どのような変化が起こりやすいかをデータから推定し、得られたモデルを使ってシミュレーション実験を行ってみました。例えば、現在の日本語はSOV語順をとり、「が」や「を」といった格標識を用います。日本語が今後SVO語順に変化する可能性が少ないながらもありますが、その際には、同時に格標識が失われ、英語や中国語のような孤立語的な言語になる可能性が高いという結果を得ました。

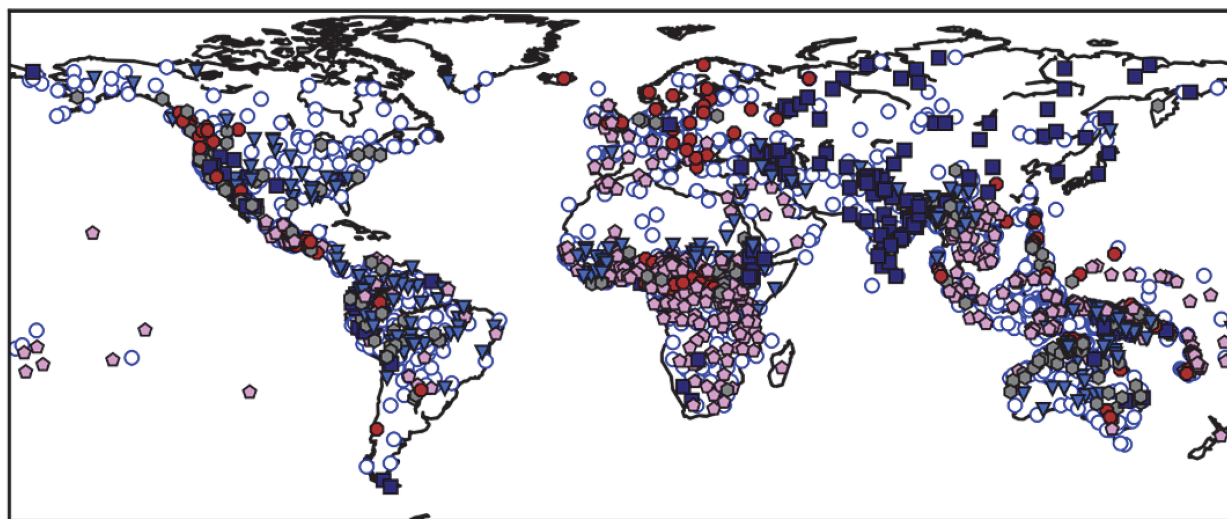


図 ある語順の特徴の地理的分布。各点は言語、色と形は特徴の値を表す。白地の丸は欠損値。

参考文献：Y. Murawaki. 2017. Diachrony-aware Induction of Binary Latent Representations from Typological Features. In Proc. of IJCNLP.

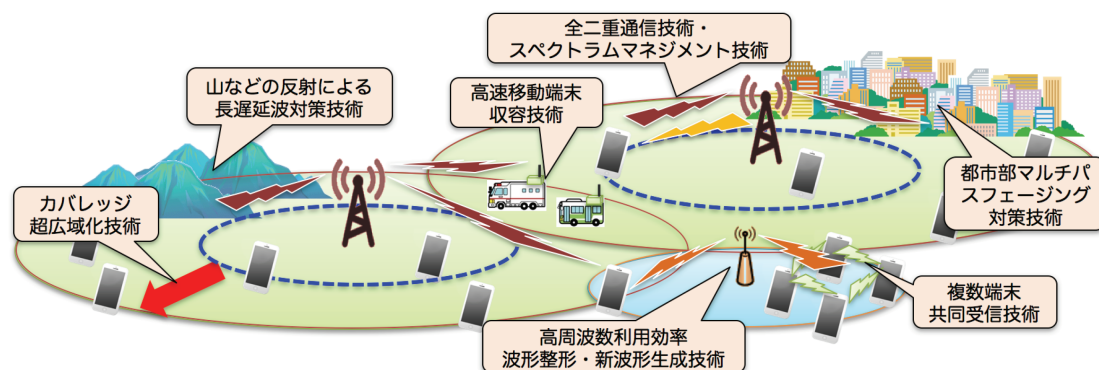


## 通信システム工学講座 デジタル通信分野（原田研究室）

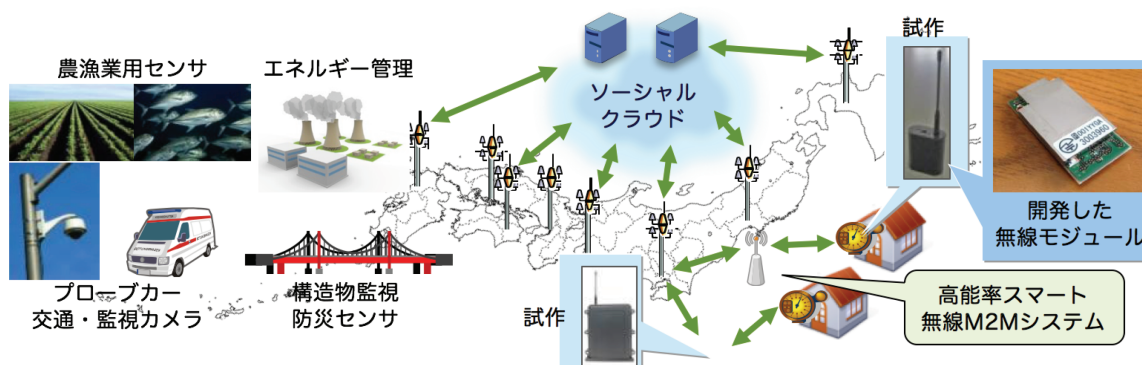
<http://www.dco.cce.i.kyoto-u.ac.jp/>

## 第5世代ブロードバンド移動通信システムに関する研究

昨今、誰もが携帯電話を所持する時代となり、音声通話やメール機能のみならず、ソーシャルネットワークサービスや動画コンテンツ、ソーシャルゲームや株・金融サービスなど、伝送情報量の爆発的増大とともに、より高信頼性およびリアルタイム性のある通信サービスが要求されています。また、これまでの様に人と人の通信のみならず、物と物（M2M）との通信など、新たな次元の無線サービス創出も期待されています。しかし、無線通信用途に使用可能な周波数資源には限りがあるため、今後益々周波数の枯渇逼迫が重要な問題になります。現在、第4世代移動通信システム（4G）としてLTEやWiMAX2などの高速移動通信網の普及が先進国を中心に急速に進んでいますが、先に述べた厳しいユーザ要求に応えるためには更なる技術革新が必要です。そこで現在、2020年代以降の実用化を目指した次世代の移動通信システム、いわゆる第5世代移動通信システム（5G）およびBeyond 5Gの研究開発が国際的に始まっており、そこでは単にセルラシステムの進化という枠に収まらない、固定通信網や無線LAN、無線PAN、および無線M2Mセンサネットワークなども包括的に議論が行われています。このような国際的な動向も踏まえ、当研究室では5Gに関する研究として、超広域ブロードバンド移動通信システム、全二重通信（Full-duplex）セルラシステム、新信号波形・新物理層方式、複数事業者が共有する集中型基地局プラットフォーム技術、高周波帯を活用した端末共同多重MIMO伝送技術、広帯域高速アンテナ近傍界測定技術、高能率スマート無線M2M通信システム、などの研究テーマを中心に研究活動を進めています。なお「複数事業者が共有する集中型基地局プラットフォーム技術」に関する研究開発は総務省から受託した「電波資源拡大のための研究開発」によって実施しています。また「高能率スマート無線M2M通信システム」に関する研究開発は内閣府革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）「社会リスクを低減する超ビッグデータプラットフォーム」により、科学技術振興機構を通して委託された研究開発として実施しています。



本研究室における第5世代ブロードバンド移動通信システムに関する研究開発概要



本研究室におけるスマート無線M2Mシステムに関する研究開発概要



## 通信システム工学講座 伝送メディア分野（守倉研究室）

<http://www.imc.cce.i.kyoto-u.ac.jp/>

### 「ゲーム理論の無線リソース制御への応用」

当研究室におけるテーマの一つに、ゲーム理論の無線通信への応用があります。ゲーム理論とは、楽しい響きをしていますが、ガッチリとした数理モデルの一種であり、経済学の発展に大きく貢献してきた理論です。本稿では、ゲームとは何か、無線通信とどのような関連があるのか、そして、我々のアプローチを順に紹介します。

経済的な主体（プレーヤと呼ばれる）が複数存在する状況を想定し、各プレーヤは利己的であることを仮定します。つまり、各々自分自身の利益を大きくしようとします。しかしながら、分配される経済資源には制限があり、また利益を拡大しようとするのは自分自身だけとは限らないため、各プレーヤは自由気ままに自分の利益を拡大できるわけではありません。これを一言で言えば、他人の意思決定が自分自身の意思決定に影響を与える状況になっています。このような状況を指し示す言葉がゲームです。

実は、無線通信においても、同様の状況が生じます。無線通信の原則に従えば、同じ場所・同じ周波数で、二組の異なる通信組の通信を同時に成功させることは困難です。一方で、一般の無線 LAN には使用可能な周波数チャネルはいくつかあり、異なるチャネルを用いれば同時に異なる通信ができます。なるほど、ではみんなが使っていない周波数チャネルを使えば多くの通信ができる（自分の利益が増える）、となるのですが、当然周りの人たちも同じように考えており、たちまち状況は複雑になります。すなわち、先に見たゲーム的な状況です。

我々は、無線 LAN アクセスポイント（AP）が複数台存在する状況下でのチャネル選択問題を、ゲームとして定式化しました。この際、「利益」を適切にデザインすることによって、各プレーヤが非同期かつ自律分散的に自身の利益を最大化するチャネルを選択するだけで、必ずナッシュ均衡と呼ばれる妥結点に収束するようにしています。また、この「利益」は他の AP と通信領域の重なりが小さければ高く、重なりが大きければ低くなるようデザインされており、無線 LAN における通信品質を反映する尺度となっています。以上により、分散的な制御でありながら、各々に満足な通信品質を与える周波数チャネルの割当が実現されることになります。本方式はアライドテレシス（株）との共同研究に基づくもので、同社が開発した AP に搭載されています。

（参考文献）[1] S. Kamiya, K. Yamamoto, T. Nishio, M. Morikura, T. Sugihara, “Spatial co-channel overlap mitigation through channel assignment in dense WLAN: Potential game approach,” IEICE Trans. Commun., vol. E100-B, no. 7, pp. 1094-1104, July 2017.

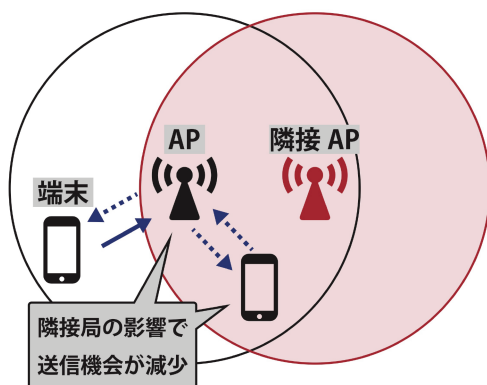


図1：セル重複による無線局の送信機会の減少

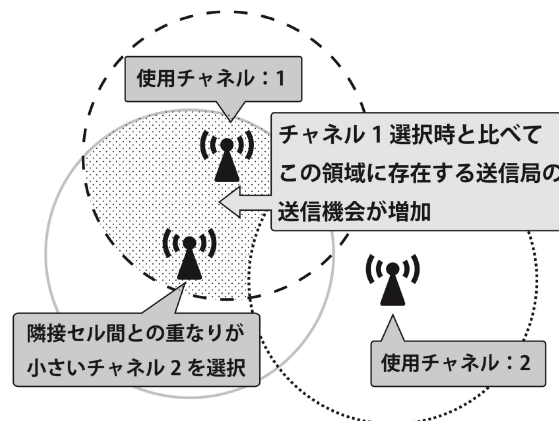


図2：セル重複面積に基づいたチャネル決定規範



## システム情報論講座 医用工学分野（松田研究室）

<http://www.bme.sys.i.kyoto-u.ac.jp>

## 生体内分子の磁気共鳴計測

生体内に存在する様々な物質は、多種多様な現象を介して相互に連携するシステムを構築し、生命の維持に関わっている。近年、疾患の存在や進行度の指標となる生体内分子（バイオマーカー）が種々の疾患について発見され、その時空間動態を可視化する分子イメージングが注目されている。当研究室では、生体内で起こる現象を分子レベルで捉えることを目指し、MRIを用いた分子イメージング手法の開発研究を進めている。本稿では、その試みのひとつを紹介する。

化学分析をはじめ幅広い分野で利用される核磁気共鳴（NMR）法の原理となる NMR 現象は、測定対象とする原子の共鳴周波数が他の原子との結合状態（分子構造）によって異なるという性質をもつ。これを化学シフトと呼び、そのパターンから周波数スペクトル上で物質を同定できる。NMR 現象を生じる核種は  $^1\text{H}$  をはじめ  $^{13}\text{C}$ 、 $^{15}\text{N}$ 、 $^{19}\text{F}$ 、 $^{31}\text{P}$  などがあり、これら多核種の観測や多岐にわたる計測法により物質の立体構造や様々な物性を評価できる。MRI は、主として生体内の水分子に含まれる  $^1\text{H}$  由来の NMR 信号を利用し、非侵襲に生体の形態や機能を高空間分解能で画像化する。上述の NMR の手法は、MRI 装置を使って生体内分子の観測に利用することができ、そのような生体での NMR 計測は MRS と呼ばれ、MRS に空間情報を付加したものが MRSI である。しかし、生体は複数の成分が混在した不均一な混合系で、低濃度の対象物質を限られた時間内に計測する必要があるため、物質の選択性の向上、検出感度の向上、撮像の高速化などの課題を解決することが重要となる。本研究では、これらの課題を解決する撮像法を提案し、生体マウスを対象にグルコースの代謝動態を観測し提案手法の有効性を確認した。

NMR 計測可能な核種のなかで最も高感度である  $^1\text{H}$  の特徴と、化学シフトの広がり大きいことにより物質の選択性が高い  $^{13}\text{C}$  の特徴の双方を活用可能な  $^1\text{H}$ - $^{13}\text{C}$  HMQC 法を用いた。これにより  $^{13}\text{C}$  に直接結合する  $^1\text{H}$  のみが観測されるため選択性が向上し、さらに  $^1\text{H}$  と  $^{13}\text{C}$  の各化学シフトを 2 軸とする 2 次元スペクトルへの展開が可能である。すなわち、 $^{13}\text{C}$  の化学シフトの情報を  $^1\text{H}$  の感度で観測できる。これに空間情報を付加した  $^1\text{H}$ - $^{13}\text{C}$  HMQC MRSI 法を構築した。撮像の高速化には、同専攻適応システム論分野（田中研究室）との共同研究で、圧縮センシング（CS）の理論を導入した。CS を用いることにより画像再構成に必要な計測点数を大幅に削減することができるため、時間分解能の向上が可能となる。図 1 は、 $^{13}\text{C}$  標識したグルコースを担癌マウスに腹腔内投与した際の、グルコースとその代謝産物である乳酸の時空間動態を追跡した結果である。フルサンプリングでは 1 枚の画像あたり 4.5 時間を要する計測に対して、CS の導入により約 2 時間の計測から時間分解能約 30 分での画像再構成が可能となった。グルコースは、投与部位（図中の“Injection cite”）と肝臓（図中の“Liver”）に強い信号が現れ時間とともに減少した。乳酸は、腫瘍（図中の“Tumor”）の部分に特異的に信号が現れ時間とともに増加した。また、図では  $^1\text{H}$ - $^{13}\text{C}$  HMQC MRSI 法で信号が検出される脂肪の信号も対照として示しているが、脂肪信号には経時的な変化は認められない。腫瘍部分で乳酸が増加する動態はワールブルク効果として知られている現象であるが、このような生体における代謝産物の時空間動態を MRI 画像として確認できる手法を提案するとともに、その有効性を動物実験で実証した。

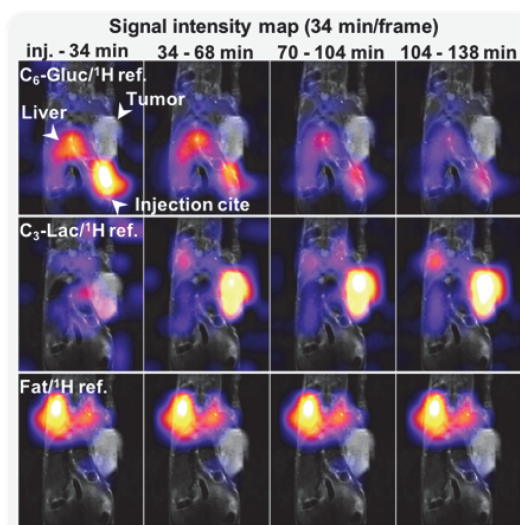


図 1. 提案手法により観測した、グルコース投与マウスにおけるグルコース、乳酸、脂肪の時空間動態。



## エネルギー材料学講座 エネルギー応用基礎学分野（土井研究室）

<http://www.device.energy.kyoto-u.ac.jp/>

## 「Cu テープ上にヘテロエピタキシャル成長させた高温超伝導薄膜」

超伝導体は冷却することで電気抵抗がゼロとなる画期的な材料です。この性質を使うことによって、強力で安定な磁場を発生することが可能になり、核磁気共鳴画像装置（MRI）、リニア中央新幹線、核磁気共鳴装置（NMR）、粒子加速器などの様々な製品が作り出されています。

超伝導体の中でも、特に高温超伝導体と呼ばれる 1 群の材料はどこでも入手可能で安価な液体窒素に浸漬して冷却するだけで電気抵抗ゼロの状態になるので、これを用いた電線（超伝導線材）を実用化できれば、従来は冷却コストが掛かりすぎるためにその使用が断念されていた電気機器に対しても超伝導線材の使用が広がることが確実視されています。また、世界各地の砂漠に太陽光発電装置を設置し、それらの太陽光発電装置群を高温超伝導線材で構築した全地球的送配電網に組み込んでしまえば、地球上の全てのエネルギーをまかなうことができるといった試算もあります（GENESIS 計画：Global Energy Network Equipped with Solar cells and International Superconductor grids [1]）。

我々は半導体製造分野で発展させられてきた薄膜成長技術（エピタキシャル成長技術）と材料加工技術を融合することで、安価で工業生産に向けた結晶方位制御技術の開発を行ってきており、高温超伝導体の結晶方位を数 km の長さに渡って単結晶のように（3 軸結晶配向）揃える新技術の開発に成功しています [2]。具体的には圧延と加熱によって 3 軸結晶配向させた銅テープを作製し、その表面にバッファ層を数層エピタキシャル成長させ、最後に高温超伝導体（ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ）をエピタキシャル成長させた高温超伝導線材の開発に成功しました。このようにして単結晶的に結晶方位を揃えた高温超伝導層を電気抵抗ゼロで流れる電流の電流密度は液体窒素中（77 K）で  $30,000 \text{ A/mm}^2$  以上に達しています。これまでに、高性能を維持しながら劇的な低コスト化を達成するために銀を不使用とした新規構造（図 1）の開発に成功し [3]、現在、国プロ等を活用して実用化に取り組んでいます。

また、このような結晶配向化技術は様々なエネルギーデバイスの性能向上に役立つ技術になる可能性を秘めています。現在、太陽電池やリチウム電池、熱発電素子、燃料電池などへの応用も研究中です。

## 参考文献

- [1] Yukinori Kuwano, Prog. Photovolt. Res. Appl. **8** (2000) 53-60.
- [2] 土井俊哉、東山和寿、“配向基板上へのタリウム系高温酸化物超伝導厚膜の形成”，応用物理，第 65 巻，1996，pp.372-376.
- [3] 土井俊哉、堀井滋、“金属系および高温超電導線材の高性能化”，応用物理，第 85 巻，2015，pp.419-422.

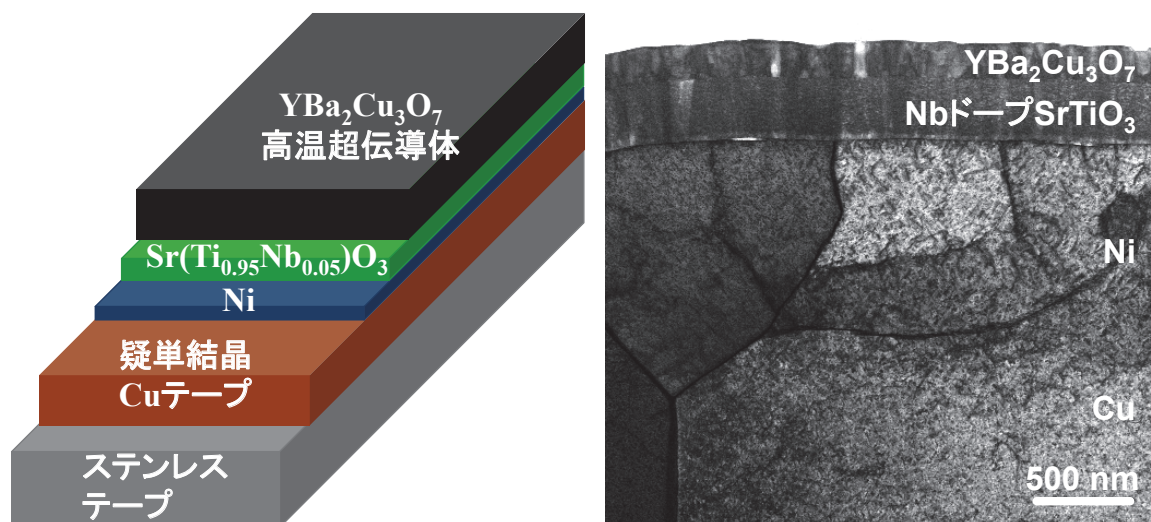


図 1 開発した高温超伝導線材の概略構造および断面の透過型電子顕微鏡写真



エネルギー科学研究科(エネルギー応用科学専攻) プロセスエネルギー学分野(白井研)  
<http://www.pe.energy.kyoto-u.ac.jp/>  
 「超電導限流器の導入による臨界故障除去時間の拡大」

## 1. はじめに

当研究室では、エネルギー問題にコミットする視点として、超電導応用エネルギー機器とこれらを導入した先進エネルギーシステムをテーマとしている。今回は、分散電源の大量導入によって複雑化する電力潮流状態における保護協調の柔軟化を目的として研究開発が進められている、新しい電力機器である超電導限流器(SFCL: Superconducting Fault Current Limiter)について紹介する。SFCLは通常時にはインピーダンスがゼロで、事故時に高インピーダンスを発生し故障電流を限流する。

我々は、良好な復帰特性を示す FCL として変圧器磁気遮蔽型 SFCL を提案し、高温超電導 REBCO テープ線材を用いた変圧器磁気遮蔽型超電導限流器を 18.26kVA, 200V 一機無限大母線実験系統に設置する目的で設計製作した(図1)。

## 2. システム模擬実験

模擬系統(図2)において限流器を設置した母線至近端で 3LG 模擬事故を起こし、MC3,4 を開いて事故回線を除去するまでの時間をパラメータとして、除去後の一回線送電で脱調する臨界の故障除去時間を評価した。

各相の事故電流は事故発生位相に依存する DC 成分を含むが、三相で平均すると初期過渡事故電流は 492A から 206A に限流し、事故中の限流器インピーダンスはほぼ設計値であることを確認した。限流の間、抵抗成分の大きな変化はなく、発熱による温度上昇も小さい良好な復帰特性を確認した。

事故中の発電機の定常相電圧は 10V (限流器なし) が 50V (限流器あり) に改善され、発電機電力は事故中も健全回線を通してある程度送電され、発電機の加速が抑制されることで、図3に示すように、臨界故障除去時間が大きく拡大することが確認できた。

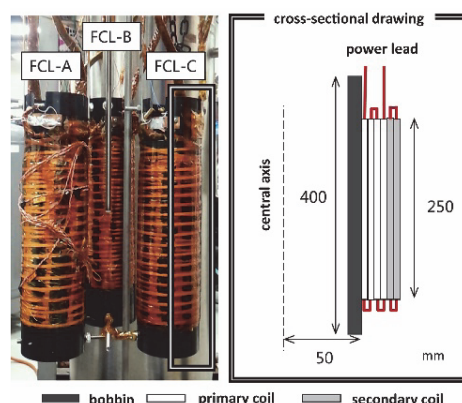


図1 製作した三相高温超電導限流器  
(液体窒素浸漬冷却)

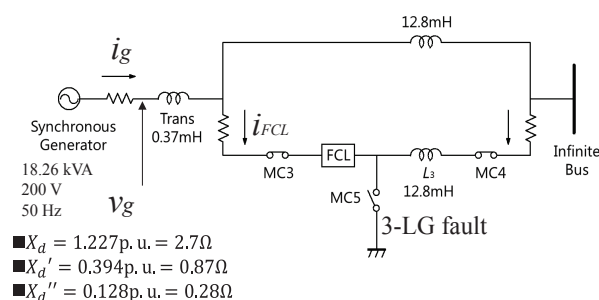


図2 限流器を含む模擬実験電力系統

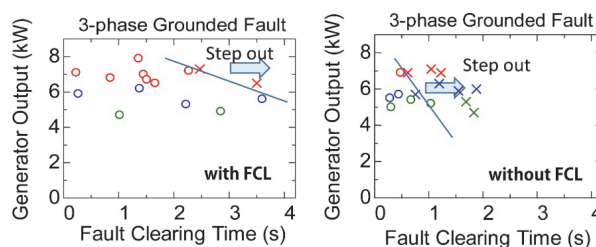


図3 限流器の臨界故障除去時間の拡大効果

## エネルギー機能変換研究部門 複合系プラズマ研究分野

<https://www.s-ee.t.kyoto-u.ac.jp/ja/information/laboratory/http>

## 「核融合エネルギーを目指したプラズマの計測への近赤外分光法の適用」

2011年の東日本大震災に起因する東京電力福島第一原子力発電所事故により、我が国はエネルギー政策の転換を余儀なくされている。いわゆる再生可能エネルギーへのシフトは究極の理想ではあるが、資源の乏しい我が国においては、当面、より環境負荷が小さく、かつベースロード電源となりうる代替エネルギーの開発が急務である。核融合エネルギーは、原子力発電と同じく核変換によって質量エネルギーを運動エネルギーとして取り出し、熱エネルギーに変換する原理に基づく。水素同位体を資源とするため、マイナーアクチニド等の長寿命の高レベル放射性廃棄物を生じず、崩壊熱密度も原子力発電に比べて小さいため、メルトダウンのリスクも低い。発電時に二酸化炭素を放出せず、燃料は海水からとり、炉内で増殖させることができ、中性子により放射化した炉内機器などの低レベル廃棄物は廃炉後100 - 200年程度で再利用も可能と見込まれるため、中長期的観点で「ゼロ・エミッション」構想に沿う、「再生可能に近い」エネルギーとも言える。

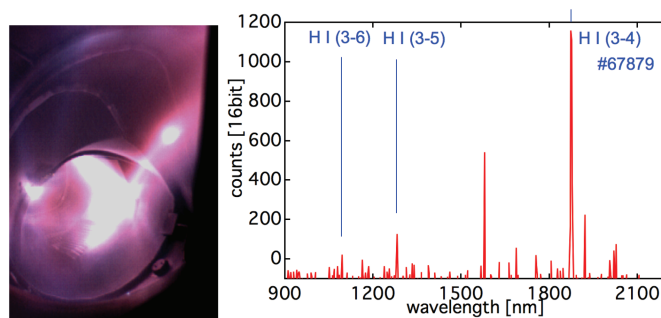
磁場閉じ込め方式による核融合研究は、プラズマの制御、加熱、計測、炉工学に分類される。京都大学で1950年代に発案され、その後一貫して発展を続けてきたヘリオトロン磁場方式は、磁気軸が平面上にあり、現在、自然科学研究機構核融合科学研究所（NIFS）で大型化路線へ引き継がれ、世界的成果を取めている。本研究室では特に、より高効率を目指して90年代に考案された「立体磁気軸ヘリオトロン磁場」によるプラズマ制御を追求している。現有のヘリオトロンJは、このいわば最適化路線に則った装置であり、実験・理論・数値解析それぞれのアプローチでプラズマ加熱、計測、閉じ込め制御に関する様々なテーマを推進している。

それらの研究の中から、発光スペクトルを利用したプラズマ診断の一例について紹介する。プラズマからの光は情報の宝庫である。完全電離したイオンは輝線スペクトルを放出しないため、イオン化エネルギーの低い(13.6 eV)燃料水素からの発光は、水素が原子や分子として存在しイオン化が頻繁に起こっているプラズマ周辺部に限る。その一方、最外殻磁気面より外側でイオン化された水素イオンはプラズマ中心部に入りにくく、周辺部の終端が開いた磁力線に沿って容器壁へと戻されてしまうため、燃料供給が困難になる。そこで、ペレットといわれる固体水素を高速でプラズマ中に入射し、直接プラズマ中心で溶発(ablation)させる燃料供給法が提案されている。

著者らは2017年度より、従来紫外～可視であった観測スペクトル領域を近赤外(2100nm程度)まで拡張する試みを始めている。近赤外分光の利点は、水素やヘリウムの重要な輝線が存在し、かつ不純物による輝線の混濁が少ないこと、紫外域では減衰が大きい光ファイバーの利用が可能であるといったことが挙げられる。欠点としては、一般に輝線強度が弱いことである。実際、通常のプラズマ放電を近赤外簡易分光器(といっても可視に比べて低感度かつ高価)で測定したところ、水素原子の輝線は可視域の代表であるバルマー系列に比べ微弱であった。ところが、ペレット入射時に測定すると図に示すようにパッシェン系列を3本同定することできた。核融合プラズマにおいてこの領域の分光診断は未開拓の分野であり、新たな展開を期待している。現在、本結果を基に、より高感度、高波長分解能の近赤外分光システムを導入中であり、プラズマの密度や温度を反映する輝線強度比の計測や、ペレット溶発雲の情報を有するスペクトル形状の計測へと展開していきたいと思っている。

<推薦書籍(Kindle版)>

「核融合：宇宙のエネルギーを私たちの手に」  
ASIN: B00TNZCKD8



図：(左) ペレット入射瞬間のモニタ映像[放電番号#69221]。(右) 近赤外分光器を用いた水素原子パッシェン系列(主量子数3を下準位にもつ遷移)の観測[#67879]。上準位4,5,6に対応してパッシェン $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ といわれる。

## 生存圏開発創成研究系 生存科学計算機実験分野（大村研究室）

<http://space.rish.kyoto-u.ac.jp/omura-lab/>

### 「地球磁気圏内のエネルギー輸送と変換過程」

地球周囲の宇宙空間を磁気圏とよび、サブストームは磁気圏でおこる最も激しい擾乱現象である。サブストームは成長相、拡大相、回復相の順で進行するが、そのハイライトは拡大相でおこるオーロラ爆発（ブレイクアップ）であろう。突然明るくなったオーロラが急速に拡大するとともに、高さ 100 キロメートル付近の電離圏で数千億ワットもの膨大なエネルギーがジュール加熱として消費される。このエネルギーの究極の源は太陽にあることは知られているが、膨大なエネルギーがどのように地球に運ばれてくるかについては良く分かっておらず、長年の謎となっている。

グローバル電磁流体シミュレーションを使って可視化した電磁エネルギーの流れを図 1 に示す。注目して頂きたい点は二つある。一つ目は太線で示されている電磁エネルギーの流れで、螺旋を描きながら地球に向かっている。電磁エネルギーを磁気圏の随所に運ぶという意味で磁気圏の動脈と言えよう。二つ目は青い面で示されているダイナモ領域で、ここでは電磁エネルギーが生成されている。いわば心臓である。最も重要な心臓はカスプ・マントル域と呼ばれる磁気圏の高緯度域にあり、太陽風のエネルギーを電磁エネルギーに変換している。オーロラ爆発が始まる直前にもう一つの心臓（ダイナモ）が夜側に現れ、これがオーロラ爆発の直接の原因となる磁力線沿いの強い電流を作り出し、電離圏にエネルギーを持ち込む要になっていると考えている。

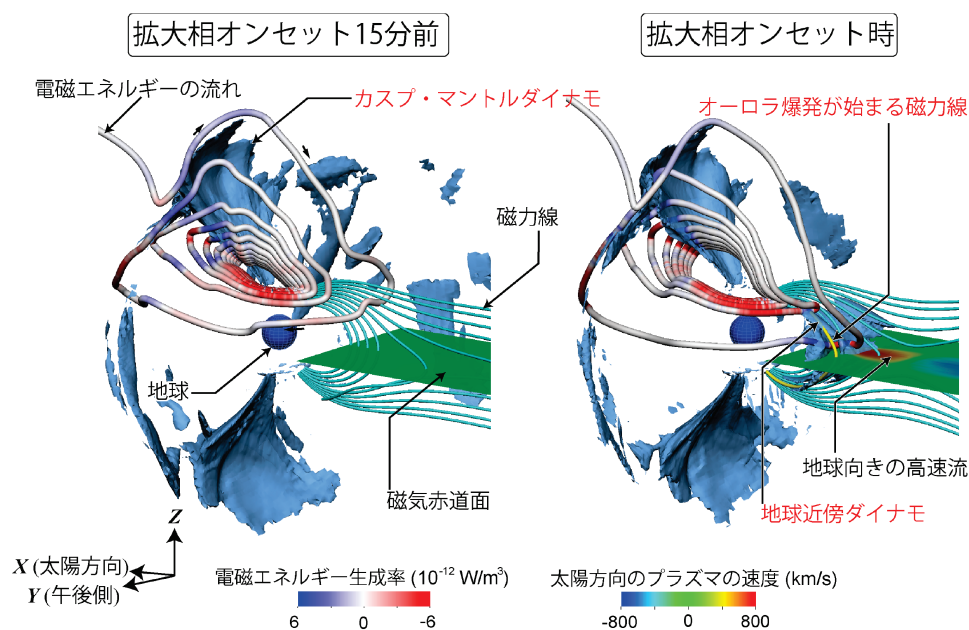


図 1：地球磁気圏内の電磁エネルギーの流れ（白線）とダイナモ領域（青面）。

### 参考文献

- [1] Ebihara and Tanaka, Energy flow exciting field-aligned current at substorm expansion onset, Journal of Geophysical Research: Space Physics, 122, doi:10.1002/2017JA024294, 2017.



# 学術情報メディアセンター ビジュアライゼーション研究分野（小山田研究室）

<http://www.viz.media.kyoto-u.ac.jp/>

## 「非線形状態空間再構成による時系列データ間の関係性の視覚的分析」

本研究室では、生命科学、神経科学や生態学のデータを用いて、各分野の先端的な解析に対して可視化技術を用いて支援する視覚的分析の研究を行っています。今回はその中でも米国カリフォルニア大学サンディエゴ校（UCSD）との共同研究内容について紹介します。

様々な分野において計測された時系列データを用いてデータ間の関係性を調べることで、背景のシステムについての理解が進められていますが、データ間の関係性がStaticではなくDynamicで状態依存的に変化する場合において、時間変化する関係性を同定するのは容易ではありません。生態学の例を挙げると、種間競争関係は常に一定ではなく、環境要因や被食捕食者の個体数に依存して時間的に変化することが知られています。このような問題に対して、2016年に非線形状態空間再構成法に基づきデータ間の時間変化する関係性を計算する手法（Empirical Dynamic Modelling: EDM）がUCSDのグループにより発表され、従来の線形のVARモデルよりも精度よく推定できることが報告されています。この手法では時系列データを状態空間上に埋め込み(embedding)を行うことで構成されたアトラクタに沿って、ヤコビアンを計算することで、変数間の関係性の変化を定量化します。このとき、入力となる複数の時系列データに加え、出力となる関係性の変化のデータ（これも時系列データ）を解釈し、システムの特徴を効率よく把握するには可視化技術とユーザーインタラクションが有効です。



図1：開発した視覚的分析システム

そこでEDMの解析を支援する視覚的分析システム（図1）を開発し、様々な分野への分析システムの適用を進めています。このシステムはEDMの計算結果であるデータ間の時間変化する関係性と入力時系列から構成されるダイナミカルネットワークの特徴を様々な角度から分析するインターフェースになります。具体的にはダイナミカルネットワークの高次元情報をt-SNEやPCA、Isomap等を用いて二次元にマッピングし、ネットワークの特徴を表す時系列プロットやノードリンクダイアグラム、散布図

等との連携可視化・ユーザーインタラクションを実現することで、ダイナミカルネットワークが有する状態を同定でき、その特徴を把握することができます。

上述のシステムを、個体群動態をシミュレートした食物連鎖網の時系列データ、及びメソコスム実験における生物種の個体数の時系列データに対して適用したところ、二次元マッピングにより、被食者の数が少ないときに捕食者間の競争関係が増大するといった、エコシステムの状態が同定されました（図2）。興味深いことに、この結果は分析システムを使わずに生態学の専門家が特定した知見と対応し、ツールを用いることで生態学的な知識無しで、背景のシステムの特徴的な状態を同定できるということが分かりました。さらに、連携可視化を用い分析することで、これまで発見されなかったエコシステムの状態を見つけることに成功し、本ツールがEDMの分析支援に有効であり、新たな発見に資することを確認しました。

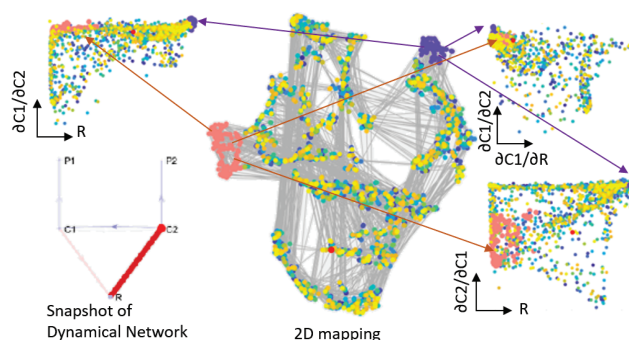


図2：連携可視化によるネットワークの状態の同定



学術情報メディアセンター 教育支援システム研究部門 遠隔教育システム研究分野 (中村研究室)  
<http://www.ccm.media.kyoto-u.ac.jp/>  
 「身体運動の連関性を用いた注意の状態の推定」

教育, 訓練, リハビリテーション, 診断などにおいて, 人間の注意の状態や注意を払う能力を知ることが重要な課題となっている. また, ロボットやスマートスピーカーなど, 一般的な生活に密着した支援システムが実現されてきているが, このようなシステムが人間の意図や注意の状態に応じて, 必要な機能を適切に発現するようなデザインも必要となる. さらに, 人間が重要な対象や事象に気付いているか, 不必要に他に注意を奪われていないかなどを推定できれば, 失敗や事故を防ぐ支援や, 注意能力に障害を持つ人への支援を行うことが可能になる.

このような課題に対し, 従来は注意の状態を推定するために視線の計測が多く用いられてきたが, 注視点の移り変わりだけでは, 複数の対象に同時に注意を向けている状態を解析することが困難だという問題がある. そのため, 本研究では, 注意を向ける対象の位置や数によって, 体の動かし方が変化することを利用する. 例えば, 複数人で会話をする場合には, 誰にどの程度注意を払っているかによって, 顔や体の向きや振り向き方が変わる. このようなことから, 我々は, 全身の動作の連関性に着目し, 注意と動作の関係をモデル化することを目指している.

右上図に頭部・体幹(胸部)・腕(手), および, 対象, 注意による仮想的な力をモデル化したものを示す. これは人間の生理学的なメカニズムとまだ大きく乖離しているが, 本研究では, まず簡易モデルによって簡単な振る舞いを検討することから始めることとした. 振る舞いとしては, 例えば, 2つの異なる注意対象があり, 片方に対峙した状態からもう一方の対象に振り向き設定を用いた. 各対象の優先度, 合図(音声), タイミングの与え方を変え, 簡易モデルに当てはめながらその違いを比較した.

右横図に実際に計測された各部位の向き(体の中心とした基準点からの方向角, 複数回の試行結果を重ねて表示)と簡易モデル上でのシミュレーション結果を示す. 上記のような結果を比較することにより, 注意による仮想的な力を想定することによって, 頭部や腕(手)が引きつけられ, それによって各部位が連動して動くことが説明できる. また, 注意の状態の違いに応じた動作の違いもある程度定性的に説明できることがわかっている. しかし, 単純なモデルで近似できない部分, 例えば, 各部位の回転角の極値, 角速度が極値をとるタイミング, 行き過ぎ(オーバーシュート)の量等, 種々の振る舞いがある. これらを説明するためには, 注意による仮想的な力の発生するタイミング, 大きさの変化等に, 上記の簡易モデルから少し逸脱したパターンを想定する必要がある. 今後は, 簡易モデルと計測から想定される内部状態のパターンを吟味し, 生理学的な状態, 例えば, 筋の活性度(筋張力の発生状態)などを計測することによってその一部を裏付けていくことが課題となっている. このような, 身体動作の連関性に注目した注意の推定は, 認知心理学・実験心理学的に見ても新しい試みであり, これらの分野の研究者と相談しながら研究を進めているところである.

